

УДК 621.396.96

С. А. ГАБЕЦ, С. Ю. СЕДЫШЕВ

**АДАПТИВНОЕ К КОРРЕЛЯЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ
ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА УСТРОЙСТВО МЕЖДУПЕРИОДНОЙ ОБРАБОТКИ***Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь, e-mail: s_a_box@mail.ru*

Представлены структура и алгоритм работы адаптивного тракта междупериодной обработки. Проведен сравнительный анализ эффективности согласованного, несогласованного и адаптивного тракта междупериодной обработки радиолокационного приемника методом математического моделирования.

Ключевые слова: радиолокационный приемник, отраженный сигнал, когерентное накопление сигнала, адаптивный решетчатый фильтр, характеристики обнаружения.

S. A. GABETS, S. U. SEDUSHEV

**A RADAR-TRACKING RECEIVER, ADAPTIVE TO CORRELATIVE CHARACTERISTICS
OF RETURNING ECHO***Military academy of Republic of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: s_a_box@mail.ru*

A structure and algorithm of work of an adaptive path processing are presented. The comparative analysis of efficiency coordinated, not coordinated and adaptive path processing of the radar-tracking receiver by a method of mathematical modeling is carried out.

Keywords: radar-tracking receiver, reflected signal, coherent accumulation of a signal, adaptive lattice filter, detection characteristics.

Введение. Для радиолокаторов кругового обзора отраженный сигнал (ОС) от воздушной цели в общем случае представляет собой частично-когерентную последовательность радиоимпульсов, промодулированную диаграммой направленности антенны [1, 2]. Ширина спектра междупериодных флуктуаций ОС зависит от множества факторов, основными из них являются тип и интенсивность маневрирования цели, погодные условия, в которых осуществляется ее полет.

В настоящее время параметры устройства когерентного накопления (КН) сигнала в обнаружителе радиолокационной станции рассчитывают, исходя либо из некоторого среднего значения времени корреляции флуктуаций сигнала, либо из знания времени наблюдения ОС. В недорогих радиолокаторах в ущерб качеству выделения сигнала на фоне помех от когерентного накопления отказываются вообще, заменяя его некогерентным накоплением (НН).

Таким образом, применяемые в существующих радиолокаторах устройства обработки сигнала потенциальной эффективности достичь не могут. В результате потери в дальности обнаружения цели могут составить 25 % [3]. Учет корреляционных свойств частично-когерентной пачки ОС позволяет получить наилучшие характеристики обнаружения приемника [1, 4]. Следовательно, адаптация параметров устройства обработки к статистическим характеристикам пачки ОС могла бы приблизить качество междупериодного накопления к потенциальному и обеспечить максимальную дальность обнаружения цели.

Адаптивное устройство междупериодного накопления сигнала. Для модели частично-когерентной пачки отраженных сигналов с временем корреляции флуктуаций τ_c оптимальная междупериодная обработка на интервале времени наблюдения T_n заключается в сочетании [1]

КН ОС на интервале времени $T_{\text{КН}} \approx \tau_c < T_{\text{н}}$; последетекторного НН на интервале времени $T_{\text{НН}} = T_{\text{н}} - T_{\text{КН}}$.

Следовательно, оценка времени корреляции флуктуаций ОС в адаптивном устройстве междупериодной обработки позволит решить задачу оптимального разбиения времени наблюдения $T_{\text{н}}$ на времена КН и НН. Кроме того, знание параметров устройства накопления сигнала позволяет рассчитать оптимальный нормированный порог обнаружения λ_* для устройства принятия решений (УПР). Например, для оптимального по критерию Неймана–Пирсона УПР при заданной условной вероятности ложной тревоги нормированный порог обнаружения λ_* можно найти из следующего уравнения [1, 4]:

$$F - \frac{\Gamma(n_0, n_0 \lambda_*)}{\Gamma(n_0)} = 0, \quad (1)$$

где F – вероятность ложных тревог; $\Gamma(n_0)$ и $\Gamma(n_0, n_0 \lambda_*)$ – полная и неполная гамма-функции; n_0 – половина числа степеней свободы χ^2 -распределения при отсутствии сигнала:

$$n_0 = L_{\text{НН}} \frac{1 - r_{\text{НН}} r_{\text{сф}}^2}{1 + r_{\text{НН}} r_{\text{сф}}^2}, \quad (2)$$

$r_{\text{сф}} = r_{\text{КН}}$ – коэффициент междупериодной корреляции флуктуаций радиолокационного фона (РЛФ) после его когерентного накопления; $r_{\text{КН}}$ – коэффициент междупериодной связи устройства КН; $r_{\text{НН}} = \exp(-1/L_{\text{НН}})$ – коэффициент междупериодной корреляции флуктуаций некогерентно накопленного сигнала; $L_{\text{НН}} = L - L_{\text{КН}} + 1$ – число НН импульсов; $L_{\text{КН}} = \text{int}(T_{\text{КН}} / T_{\text{п}})$ – целое число КН импульсов; $T_{\text{п}}$ – период повторения зондирующего сигнала радиолокатора; L – число импульсов пачки ОС.

В данной статье корреляционные свойства флуктуирующей последовательности ОС аппроксимируются экспоненциальной функцией $r_{Lc}(\tau) = \exp(-|\tau|/\tau_c) \exp(-2/L)$. Тогда оценка коэффициента междупериодной корреляции ОС

$$r_{\text{КН}} = r_{Lc} = \exp(-T_{\text{п}} / T_{\text{КН}}) \quad (3)$$

позволяет рассчитать значения времен КН и НН:

$$T_{\text{КН}} = -T_{\text{п}} / \ln(r_{Lc}); \quad T_{\text{НН}} = T_{\text{н}} - T_{\text{КН}}, \quad (4)$$

и половину числа степеней свободы n_0 χ^2 -распределения.

Структура устройства адаптивной обработки флуктуирующей последовательности ОС показана на рис. 1, а.

Входным сигналом $x(kT_{\text{п}})$ устройства междупериодной обработки (МПО) служит выходной сигнал внутрипериодной обработки ($x(kT_{\text{п}}) = F(kT_{\text{п}})$) или выходной сигнал устройства когерентной компенсации мешающих отражений ($x(kT_{\text{п}}) = S_1(kT_{\text{п}})$).

Рассматривается реализация устройства междупериодного накопления сигнала на БИХ (бесконечная импульсная характеристика)-фильтрах (рис. 1, б). Выбор БИХ-фильтра первого порядка для адаптивного устройства КН обусловлен экспоненциальной аппроксимацией нормированной корреляционной функции междупериодных флуктуаций ОС [1]. Модуль комплексного коэффициента междупериодной

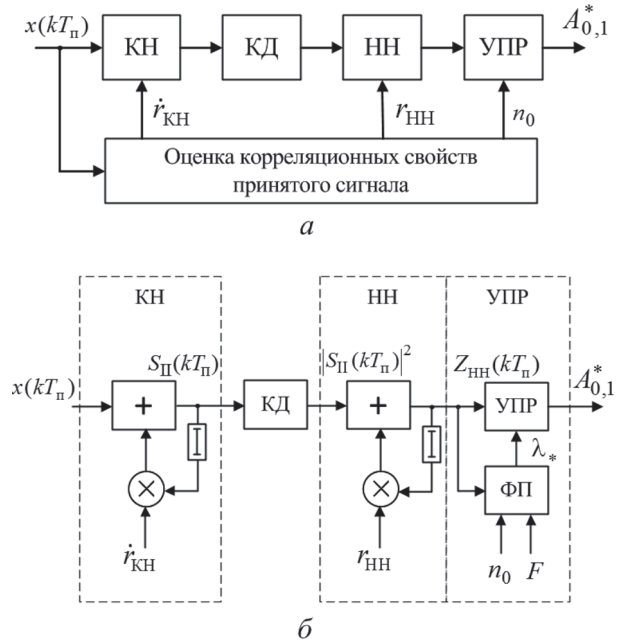


Рис. 1. Структурные схемы: а – адаптивное к свойствам флуктуирующей последовательности ОС устройство междупериодной обработки, б – устройство междупериодной обработки на БИХ-фильтрах первого порядка

корреляции $|\dot{r}_{Lc}|$ задает коэффициент обратной связи рециркулятора, а значит, и время КН. Аргумент комплексного коэффициента междупериодной корреляции $\arg(\dot{r}_{Lc})$ определяет набег фазы ОС за период зондирования, компенсируя тем самым частоту Доплера сигнала. Выбор рециркулятора для НН обусловлен простотой управления его постоянной времени путем изменения коэффициента обратной связи $m_{НН} = r_{НН}$. Расчет нормированного порога обнаружения λ_* для УПР проводится в соответствии с выражениями (1)–(4).

Оценка комплексного коэффициента междупериодного сигнала \dot{r}_{Lc} осуществляется с помощью адаптивного фильтра, включенного в режиме предсказания [5–7] (рис. 2, а). Существует большое многообразие адаптивных фильтров [5–8]. Основными показателями качества их работы являются точность оценки весовых коэффициентов и скорость сходимости процесса адаптации. Лучшими показателями обладают решетчатые (лестничные) фильтры (РФ), основанные на рекурсивном методе наименьших квадратов [5, 7, 8] (рис. 2, б).

Приняты следующие обозначения: x_k – входной сигнал, дискретный момент времени k соответствует номеру периода зондирования; $\Delta_{i,k}^{пр}$, $\Delta_{i,k}^{обр}$ – ошибки прямого и обратного предсказания; $K_{i,k}^{пр}$, $K_{i,k}^{обр}$ – прямой и обратный коэффициент отражения (комплексный коэффициент междупериодной корреляции).

Алгоритм работы РФ порядка P , основанный на рекурсивном методе наименьших квадратов, представлен в [5, с. 145]. Коэффициенты отражения $K_{i,k}^{пр}$ и $K_{i,k}^{обр}$ на k -м шаге самонастройки РФ можно представить в виде

$$K_{i+1,k}^{пр\text{ опт}} = K_{i+1,k}^{обр\text{ опт}} = \frac{\Delta_{i,k}^{пр} \Delta_{i,k}^{обр*}}{\Delta_{i,k}^{пр2}}. \quad (5)$$

При этом первый прямой (или обратный) коэффициент отражения является оценкой комплексного коэффициента междупериодной корреляции входного сигнала

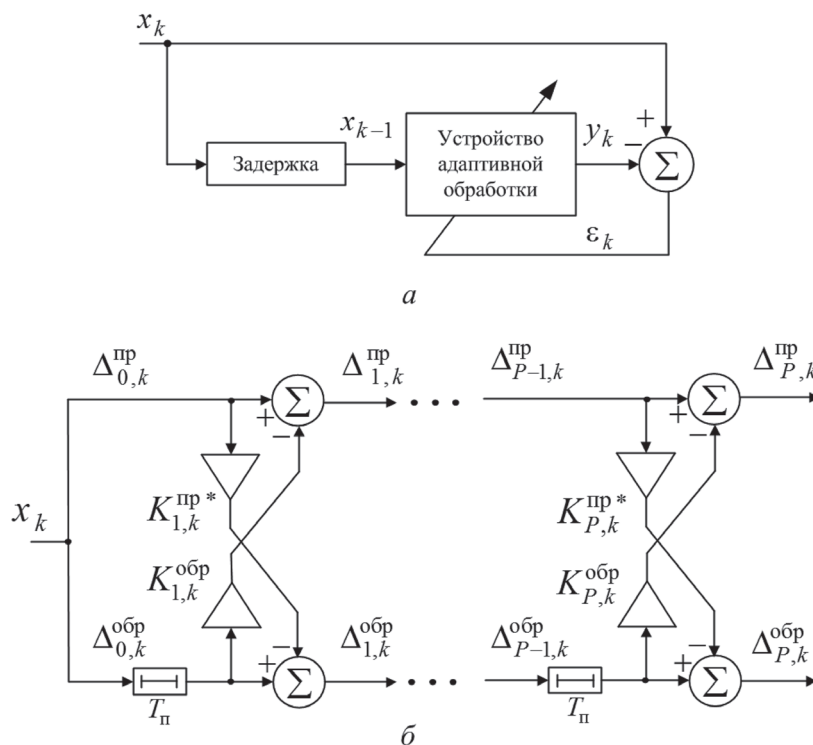


Рис. 2. Структурные схемы: а – обобщенная структура адаптивного предсказателя; б – решетчатый фильтр, основанный на рекурсивном методе наименьших квадратов

$$K_{1,k}^{\text{пр опт}} = \frac{\overline{\Delta_{0,k}^{\text{пр}} \Delta_{0,k-1}^{\text{обр}*}}}{\overline{\Delta_{0,k}^{\text{пр}^2}}} = \frac{\overline{x_k x_{k-1}^*}}{\overline{x_k^2}} = \dot{r}_{Lc}, \quad (6)$$

которая используется для настройки устройств междупериодного накопления и принятия решений об обнаружении.

Заметим, что при экспоненциальной аппроксимации корреляционных флуктуаций последовательности ОС для оценки комплексного коэффициента междупериодной корреляции сигнала \dot{r}_{Lc} можно использовать адаптивный РФ первого порядка. Это обусловлено ленточной структурой обратной корреляционной матрицы сигнала [1, 8].

Эффективность обнаружителя с адаптивным устройством накопления. Эффективность обнаружителя, адаптивного к корреляционным характеристикам отраженного сигнала, будем оценивать по величине коэффициента КН (эффективность устройства КН) и по характеристикам обнаружения [1].

Эффективность устройства КН определялась таким образом:

$$v_{\text{КН}} = \begin{cases} \frac{1+r_{Lc}}{1-r_{Lc}}, & \text{если } r_{Lc} \leq r_{\text{КН}}, \\ \frac{1+r_{\text{КН}}}{1-r_{\text{КН}}}, & \text{если } r_{Lc} > r_{\text{КН}}. \end{cases} \quad (7)$$

Характеристики обнаружения рассчитывались в соответствии с выражениями

$$D = e^{-x_1} \sum_{m=0}^{n_1-1} \frac{x_1^m}{m!}; \quad x_1 = \frac{n_1 \lambda_*}{1+\rho}; \quad \rho = \mu v_{\text{КН}}, \quad (8)$$

где μ – отношение сигнал/шум на выходе устройства когерентной компенсации мешающих отражений:

$$\mu = \frac{\mathcal{E}_0}{N_0 + N_{\text{п}} / v_1}.$$

Здесь \mathcal{E}_0 – энергия одиночного отраженного сигнала; N_0 – спектральная плотность мощности внутренних шумов радиолокационного приемника; $N_{\text{п}}$ – спектральная плотность мощности мешающих отражений; v_1 – коэффициент подавления мешающих отражений; ρ – отношение сигнал/шум на выходе устройства КН; n_1 – половина числа степеней свободы χ^2 -распределения при наличии сигнала:

$$n_1 = L_{\text{НН}} \frac{1 - r_{\text{НН}} \left(\frac{\mu r_{Lc}}{1+\mu} \right)^2}{1 + r_{\text{НН}} \left(\frac{\mu r_{Lc}}{1+\mu} \right)^2}. \quad (9)$$

Нормированный порог обнаружения λ_* при заданной вероятности ложной тревоги F определялся из уравнения (1) с учетом выражения [1]:

$$F(n_0, x_0) = \frac{\Gamma(n_0, x_0)}{\Gamma(n_0)} = e^{-x_0} \sum_{m=0}^{n_0-1} \frac{x_0^m}{m!}, \quad x_0 = n_0 \lambda_*. \quad (10)$$

Определение эффективности обнаружителя с адаптивным устройством накопления сигнала проводилось численными методами на примере двухкоординатного радиолокатора обзора с периодом повторения $T_{\text{п}} = 1$ мс, скоростью вращения антенной системы $\Omega_{\text{СК}} = 36$ град/с и разрешающей способностью по азимуту $\Delta\beta = 1,5^\circ$. Отраженный сигнал моделировался с учетом частоты

Доплера в виде комплексных междупериодных отсчетов экспоненциально-коррелированного случайного процесса с заданными корреляционными свойствами ($r_{Lc} = 0,9$) и отношения сигнал/шум на выходе устройства когерентной компенсации мешающих отражений. Эти отсчеты модулировались диаграммой направленности антенны, длительность огибающей которой обеспечивала наблюдение $L = 40$ импульсов пачки ОС. Принятый сигнал в виде аддитивной смеси ОС и комплексного белого гауссова шума подавался на вход обнаружителя с адаптивным устройством накопления сигнала.

Для сравнения эффективности адаптивного обнаружителя с обнаружителями, у которых устройства накопления сигнала имеют фиксированные параметры, математическое моделирование проводилось также для следующих случаев:

точно известного коэффициента корреляции флуктуирующей пачки ОС ($r_{KH} = r_{Lc}$, случай согласованной фильтрации пачки ОС) и оптимального разделения времени наблюдения на этапы КН и НН;

несогласованной фильтрации пачки ОС ($r_{KH} = 0,7 < r_{Lc}$) и неоптимального разделения времени наблюдения на этапы КН и НН.

В обоих случаях устройства КН точно настроены на частоту Доплера сигнала.

Результаты моделирования процесса междупериодного накопления сигнала показаны на рис. 3, а и б. Видно, что адаптивный накопитель сигнала приближается по эффективности к устройству согласованной междупериодной фильтрации. В табл. 1 приводятся значения оценок эффективности КН, полученные по результатам моделирования различных устройств МПО.

Из рис. 3 и табл. 1 видно, что по эффективности когерентного накопления адаптивная МПО несколько проигрывает согласованной, что объясняется ошибками оценивания коэффициента междупериодной корреляции. При этом эффективность несогласованного КН в среднем на 4 дБ ниже, чем эффективность адаптивного устройства КН.

На рис. 4 приведены характеристики обнаружения ОС при заданной вероятности ложных тревог $F = 10^{-5}$. Для адаптивного устройства МПО характеристики получены по результатам моделирования процесса обработки принятого сигнала для диапазона изменений отношения сигнал/шум $\mu = 0,1 \div 10$ с шагом 0,1. Для каждого значения μ генерировалось 3000 выборок по 200 отсчетов принятого сигнала, каждая выборка содержала 40 импульсов пачки ОС с заданными корреляционными свойствами ($r_{Lc} = 0,9$).

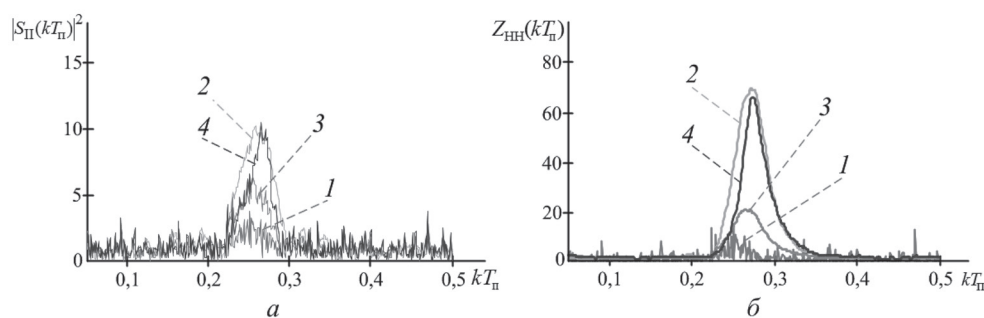


Рис. 3. Результаты моделирования процесса обработки устройствами МПО: а, б – сигналы на выходе устройств КН и НН соответственно; 1 – сигнал на входе устройства накопления, $\mu = 2$ (3 дБ); 2, 3 – выходные сигналы согласованного и несогласованного устройств накопления соответственно; 4 – выходной сигнал адаптивного устройства накопления

Таблица 1. Показатели эффективности устройств когерентного накопления

Эффективность когерентного накопления	Согласованная МПО	Адаптивная МПО	Несогласованная МПО
ν_{KH} , дБ	12,8	12,1	8

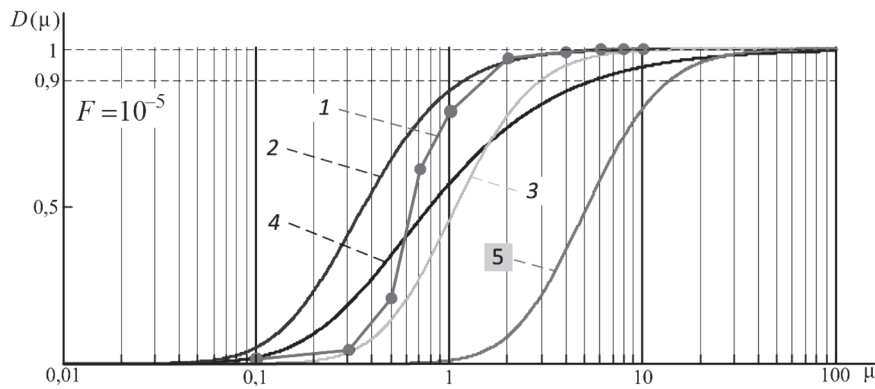


Рис. 4. Характеристики обнаружения пачки отраженных сигналов при заданной вероятности ложных тревог: 1, 2 – адаптивное и согласованное устройства накопления сигнала соответственно; 3 – несогласованное устройство накопления, 4, 5 – когерентное и некогерентное накопление на всем интервале времени наблюдения соответственно

Для устройств согласованной и несогласованной МПО коэффициент междупериодной связи $r_{\text{КН}}$ устройства КН считался точно известным, что позволило построить их характеристики обнаружения теоретически. Кроме того, на рис. 4 приведены характеристики обнаружения при КН и НН сигнала с $r_{\text{Лс}} = 0,9$ на всем интервале времени наблюдения $T_{\text{н}}$. Из рисунка видно, что кривая обнаружения радиолокационного приемника с адаптивным сочетанием времен КН и НН (кривая 1) уже при $\mu > 0,7$ практически совпадает с теоретической кривой 2 (согласованная обработка) и достигает требуемой условной вероятности правильного обнаружения (например, $D_{\text{тр}} = 0,9$ при отношении сигнал/шум $\mu_{\text{тр}} = 1,5$). В случае согласованной обработки (кривая 2) условная вероятность правильного обнаружения $D_{\text{тр}}$ достигается при $\mu_{\text{тр}} = 1,2$, а в случае несогласованной обработки (кривая 3) – при $\mu_{\text{тр}} = 3$. Для обнаружителей сигнала с КН и НН на всем интервале наблюдения условная вероятность $D_{\text{тр}}$ достигается при $\mu_{\text{тр}} = 5$ и $10,5$ соответственно (кривые 4, 5).

Если считать, что при согласованной междупериодной обработке флуктуирующей пачки ОС достигается максимальная дальность обнаружения радиолокатора с заданными F и $D_{\text{тр}}$, то увеличение $\mu_{\text{тр}}$ приводит к уменьшению его зоны действия (табл. 2).

Таблица 2. Относительная дальность обнаружения радиолокатора

Параметр	Согласованная МПО	Адаптивная МПО	Несо согласованная МПО	Когерентное накопление на интервале $T_{\text{н}}$	Некогерентное накопление на интервале $T_{\text{н}}$
$\mu_{\text{тр}}$	1,2	1,5	3	5	10,5
Относительная дальность обнаружения, %	100	95	80	70	58

Закключение. В настоящее время в существующих радиолокационных станциях обзора и точного измерения координат устройства междупериодной обработки не используют адаптивное перераспределение времен КН и НН в зависимости от корреляционных свойств флуктуирующей последовательности отраженных сигналов. Широкое распространение получили типовые схемы построения радиолокационных обнаружителей: с КН на всем интервале наблюдения; с НН на всем интервале наблюдения; с КН на фиксированном интервале времени с последующей критерийной обработкой.

Из графиков кривых обнаружения (рис. 4) и табл. 2 видно, что в этом случае можно потерять 20–40% дальности обнаружения радиолокатора только из-за несогласованного с корреляционными свойствами ОС устройства междупериодной обработки.

Очевидно, что оптимальное распределение времени наблюдения между устройствами КН и НН в зависимости от статистических свойств ОС приближает дальность обнаружения радиолокатора к потенциальной. Можно отметить, что качество работы обнаружителя становится инвариантным к типу цели и условиям ее полета.

Необходимо отметить, что в данной статье рассматривалась ситуация, когда в элементе разрешения радиолокационной станции по дальности присутствовал сигнал от одной цели с некоторой частотой Доплера. Приведенный на рис. 2, б решетчатый фильтр порядка P представляет собой один из возможных вариантов построения адаптивного устройства с последовательной декорреляцией входного сигнала. Это значит, что решетчатый фильтр способен разрешать сигналы целей по частоте Доплера в одном элементе радиолокатора.

В существующих радиолокационных приемниках обзора различного назначения для проведения обзора по частоте Доплера используются десятки – сотни узкополосных фильтров. Рассмотренное в статье устройство адаптивной обработки может быть выполнено многоканальным, рассчитанным на одновременное обнаружение трех – пяти целей в одном элементе разрешения радиолокатора по дальности. Таким образом, достигается значительная экономия аппаратных и вычислительных ресурсов приемника обзора.

Поскольку качество оценивания коэффициента междупериодной корреляции оказывает прямое влияние на эффективность адаптивного обнаружителя, актуальной является задача отыскания алгоритмов самонастройки с высокой скоростью сходимости процесса адаптации, работающих в условиях приема «слабых» сигналов [1]:

$$\mu < \frac{1 - r_{Lc}}{1 + r_{Lc}}.$$

Для ее решения перспективным может оказаться использование адаптивных фильтров с бесконечной импульсной характеристикой, структура и параметры которых определяется моделью входного процесса в виде авторегрессии скользящего среднего.

Список использованной литературы

1. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и РЭБ. Ч. 1. Основы радиолокации / А.Е. Охрименко. – М.: Воениздат, 1983. – 456 с.
2. Горшков, С. А. Основы радиолокации: конспект лекций / С. А. Горшков, В. В. Латушкин, С. Ю. Седышев. – Минск: ВА РБ, 2003. – Ч. 1. – 127 с.
3. Габец, С. А., Седышев, С. Ю. Характеристики обнаружения радиолокационного приемника, учитывающего корреляционные свойства отраженного сигнала / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Вестн. Военной академии Республики Беларусь. – 2014. – № 1 (42). – С. 81–87.
4. Латушкин, В. В. Основы радиолокации. Модели сигналов и помех: конспект лекций / В. В. Латушкин, С. А. Горшков, С. Ю. Седышев. – Минск: ВА РБ, 2005. – Ч. 2. – 172 с.
5. Адаптивные фильтры / П. М. Грант [и др.]; пер. с англ. – М: Мир, 1988. – 392 с.
6. Видроу, Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Видроу, С. Стирнз; пер. с англ. – М: Радио и связь, 1989. – 440 с.
7. Джиган, В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и практика / В. И. Джиган. – М.: Техносфера, 2013. – 528 с.
8. Теоретические основы радиолокации: учебное пособие / В. В. Алмазов [и др.]. – Харьков: ХВУ, 1996. – Ч. 2. – 469 с.

Поступила в редакцию 03.04.2015